

УДК 622.61: 537.533

В.В. СОЛОВЕЙ, докт. техн. наук, **П.М. КАНИЛО**, докт. техн. наук,
А.В. КОШЕЛЬНИК, канд. техн. наук, ИПМаш НАН Украины
В.Е. КОСТЮК, канд. техн. наук, Национальный аэрокосмический
университет «ХАИ»

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО УГЛЯ ПУТЕМ ЕГО НАГРЕВА ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ВОДОРОДА В ОБОГАЩЕННОМ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХЕ

Представлено математичну модель процесів, що відбуваються в реакторі термохімічної підготовки високозольного вугілля при його нагріванні продуктами згоряння природного газу й водню в збагаченому киснем повітрі. Проаналізовано результати чисельного моделювання для різних варіантів запитки реактора реагентами.

The mathematical model of the processes occurring in a reactor for thermochemical preparation of high-ash coal during its heating by products of natural gas and hydrogen combustion in the oxygen enriched air is presented. The results of numerical modeling for various variants of the reactor feeding by reagents are analysed.

Постановка проблемы. Современное состояние экономики Украины требует существенным образом сократить использование природного газа и мазута как вспомогательного топлива на твердотопливных электростанциях. Поэтому в данное время актуальной является задача поиска технических решений, которые позволяют решать проблему стабилизации горения пыле-

угольного топлива высокой зольности, имеющих малый выход летучих. Эта проблема может быть решена путем применения так называемой технологии "кипящего слоя" [1]. Но ее использование требует общей реконструкции существующего оборудования тепловых электростанций, что связано со значительными финансовыми затратами.

Одним из перспективных путей решения проблемы сжигания угольной пыли с низким содержанием летучих (антрациты, тощие угли) является применения плазмотермической подготовки пылевидного топлива перед сжиганием [2].

Целью настоящего исследования является оценка с помощью методов вычислительной аэрогидродинамики эффективности термохимической подготовки (ТХП) высокозольного угля при его нагреве продуктами сгорания природного газа и водорода в обогащенном кислородом воздухе.

Постановка задачи и методы решения. Реактор ТХП представлял собой круглую трубу с внезапным расширением длиной 1500 мм, через которую продувалась полидисперсная пылеугольная аэросмесь донецкого антрацита марки АШ с воздухом, содержащим различное количество кислорода (предполагалось, что кислород предварительно смешан с воздухом на молекулярном уровне). В центре входного отверстия установлен капилляр диаметром 8 мм, через который внутрь реактора вводился метан или водород.

При математическом описании физико-химических процессов в реакторе ТХП принимались следующие основные допущения: течение несущей газовой среды квазистационарное, турбулентное, несжимаемое, многокомпонентное, химически реагирующее; скорость газозольных химических реакций бесконечно велика; газовая смесь находится в состоянии термодинамического равновесия; плавучестью, объемной вязкостью, вязким нагревом и лучистым теплообменом пренебрегаем; угольные частицы сферические; объемом, занимаемым частицами, пренебрегаем; горение угольных частиц включает процессы выхода и воспламенения летучих, газификации и выгорания коксового остатка; турбулентность изотропная; турбулентное рассеивание частиц отсутствует; частицы и теплотери не оказывают влияния на параметры турбулентности.

Пылеугольная аэросмесь моделировалась как двухфазная смесь с эйлеровым описанием газовой фазы (сплошная среда) и лагранжевым описанием движения угольных частиц (траекторная модель). Взаимодействие фаз учитывалось на основе модели «частица-источник в ячейке» [3], в соответствии с

которой присутствие частицы в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы. Полагалось, что мгновенное термохимическое состояние потока однозначно определяется консервативной скалярной величиной – безразмерной функцией Шваба-Зельдовича, которая имеет смысл массовой доли восстановленного топлива. Взаимодействие химических процессов и турбулентности описывалось статистически с помощью функции плотности распределения вероятности (ПРВ).

При сделанных допущениях поведение газовой фазы описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, двух уравнений дифференциальной модели турбулентности k-ε типа [4], уравнений сохранения для безразмерных функций Шваба-Зельдовича f_n и для пульсаций этих функций $g_n = f_n'^2$ [5, 6] вида:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_n; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = S_{fi}, j = 1, 2; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_q, j = 1, 2; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho(G - \epsilon) = 0, j = 1, 2; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial u_j \epsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - \rho(C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \frac{\epsilon}{k} = 0, j = 1, 2; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial (\vec{u} f_n)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial f_n}{\partial x_j} \right) + S_n, j = 1, 2, n = 1, 2; \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial (\vec{u} g_n)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial g_n}{\partial x_j} \right) + C_g \mu_T \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} g_n, j = 1, 2, n = 1, 2, \quad (7)$$

где u_j – декартовы компоненты вектора осредненной скорости газа; x_j – декартовы координаты; S_n – источник массы, соответствующий переносу массы

в газовую фазу от реагирующих частиц (при $n = 1$), $S_n = 0$ при $n = 2$; ρ – плотность газа; p – давление газа; $\tau_{ij} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – компоненты тензора напряжений. Здесь μ – динамическая вязкость; μ_T – турбулентная вязкость, определяемая по формуле Колмогорова-Прандтля [7]; C_μ – эмпирический коэффициент; $k = \frac{1}{2} u'_j u'_i$ – кинетическая энергия турбулентности; u'_i – возмущения скорости газа относительно осредненного значения; ν – коэффициент кинематической вязкости; S_{ff} – источник количества движения, обусловленный межфазным взаимодействием; $\varepsilon = \frac{1}{2} \nu \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2$ – удельная скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; $h = \sum_i Y_i \left(\Delta h_{fi}^0 + \int_{T^0}^T c_{pi}(T) dT \right)$ – удельная энтальпия: Y_i – массовая доля химического компонента i ; Δh_{fi}^0 – удельная энтальпия образования химического компонента i ; T и T^0 – температура газа и стандартная температура соответственно; c_{pi} – удельная теплоемкость химического компонента i при постоянном давлении; Pr – число Прандтля; Pr_T – турбулентное число Прандтля; S_q – источник теплоты, обусловленный межфазным взаимодействием с частицами; σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – эмпирические коэффициенты; $G = \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – член, характеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений; σ_T , C_g и C_d – эмпирические коэффициенты.

Для первичного топлива (продуктов газификации угля) – $n = 1$, для вторичного топлива (метана или водорода) – $n = 2$.

Безразмерная функция Шваба-Зельдовича определяется выражением:

$$f_n = \frac{Z_q - Z_{q.O}}{Z_{q.F_1} - Z_{q.O}}; \quad (8)$$

$$f_1 + f_2 + f_o = 1, \quad (9)$$

где Z_q – массовая доля элемента q . Индексы « F_1 » и « O » относятся к первичному топливу (продуктам газификации угля) и окислителю (кислороду) соот-

ветственно.

Все термохимические скаляры φ_i (массовые доли химических компонентов, плотность и температура) зависят исключительно от f_n :

$$\varphi_i = \int_0^1 \int_0^1 \varphi_i(f_1, f_2, h) P_1(f_1) P_2(f_2) df_1 df_2, \quad (10)$$

где h – мгновенная энтальпия; $P_n(f_n)$ – функция ПРВ, описывающая вероятность того, что значение переменной φ_i находится между φ и $(\varphi + \Delta\varphi)$ и аппроксимируемая β -функцией.

Система уравнений (1) – (7) является незамкнутой. Необходимая для ее замыкания связь между термодинамическими переменными p , T и ρ устанавливается уравнением состояния смеси идеальных газов:

$$p = R\rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}, \quad (11)$$

где R – универсальная газовая постоянная; M_i – молекулярная масса химического компонента i .

Для определения источников членов S_n в уравнениях (1) и (6), S_{fi} – в уравнении (2) и S_q – в уравнении (3) использовалась модель межфазного взаимодействия, реализуемая поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

Весь диапазон начальных размеров угольных частиц делился на конечное число дискретных интервалов, каждый из них представляется средним диаметром, для которого выполнялся расчет траектории и тепломассообмена. При этом каждая моделируемая частица представляла собой «пакет» частиц с одинаковыми траекториями. Распределение частиц по размерам описывалось формулой Розина-Раммлера:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (12)$$

где Y_d – массовая доля частиц с диаметром, большим d ; \bar{d} – медианный диаметр частиц; n – параметр распределения.

Траектории частиц моделировались путем интегрирования уравнения баланса сил, действующих на частицу, которое уравнивает инерцию частицы с силой аэродинамического сопротивления:

$$\frac{du_{pj}}{dt} = -\frac{3\rho C_R}{4\rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \sqrt{\sum_j (u_{pj} - u_j)^2}, j=1, 2, 3, \quad (13)$$

где u_{pj} – декартовы компоненты вектора скорости частицы; t – время; C_R – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; Re_p – относительное число Рейнольдса частицы; ρ_p – плотность частицы; d_p – диаметр частицы.

Для вычисления C_R использовалась эмпирическая зависимость $C_R = f(Re_p)$ для одиночной сферы.

Тепломассообмен угольных частиц описывался тремя моделями: моделью теплообмена инертной частицы; моделью выхода летучих и моделью выгорания коксового остатка.

Модель теплообмена инертной частицы применялась до тех пор, пока температура частицы T_p не превышала температуру выхода летучих T_v . При этом температура частицы полагалась постоянной по объему и изменялась в соответствии с балансом тепла, определяемым уравнением:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p), \quad (14)$$

где m_p – масса частицы; c_p – удельная теплоемкость частицы; T_p – температура частицы; α – коэффициент теплоотдачи; S_p – площадь поверхности частицы; T_∞ – локальная температура газа.

Модель выхода летучих использовалась, когда температура угольной частицы достигала температуры начала выхода летучих T_v и оставалась в силе до тех пор, пока масса частицы m_p превышала начальную массу нелетучих компонентов в частице $T_p \geq T_v$ и $m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0}$, где $f_{v,0}$ – массовая доля летучих, изначально присутствующих в частице.

Тепломассообмен частицы во время выхода летучих описывался системой уравнений:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_v, \quad (15)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -f_{v,0} m_{p,0} k_w, \quad (16)$$

где h_v – удельная теплота образования летучих; $m_{p,0}$ – начальная масса частицы; $k_w = A_1 e^{-(E/RT_p)}$ – кинетическая скорость, определяемая уравнением Аррениуса (A_1 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации).

Данная модель выхода летучих предполагает, что скорость выхода летучих в первую очередь зависит от количества летучих, оставшихся в частице [7].

Модель выгорания коксового остатка применялась по окончании выхода летучих и до тех пор, пока не выгорит весь коксовый остаток, т.е. $(1 - f_{v,0} - f_\kappa) m_{p,0} < m_p < (1 - f_{v,0}) m_{p,0}$, где f_κ – массовая доля кокса, изначально присутствующего в частице.

Данная модель выгорания кокса предполагает, что скорость поверхностной реакции определяется как кинетической, так и диффузионной составляющими. Тепломассообмен частицы при выгорании коксового остатка описывался системой уравнений:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_u, \quad (17)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -S_p p_{O_2} \frac{D_0 R_w}{D_0 + R_w}, \quad (18)$$

где f_h – эмпирический коэффициент; H_u – удельная теплота сгорания кокса; p_{O_2} – парциальное давление кислорода в газе; $D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0,75}}{d_p}$ – коэффициент диффузионной скорости. Здесь C_1 – эмпирический коэффициент; d_p – диаметр частицы; $R_w = C_2 e^{-(E/RT_p)}$ – коэффициент кинетической скорости (C_2 – предэкспоненциальный множитель).

После того, как весь коксовый остаток выгорит, частица состоит из

зольного остатка, и для нее справедлива модель теплообмена инертной частицы, описываемая уравнением (14).

Дискретизация исходных дифференциальных уравнений в частных производных (1) – (7) производилась методом контрольных объемов с применением схемы первого порядка точности для аппроксимации конвективных членов. Решение получающихся в результате систем линейных алгебраических уравнений, выполнялось методом Гаусса-Зейделя с использованием алгоритма SIMPLE [8]. Интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14) – (18) осуществлялось методом Рунге-Кутты. Для расчета условий химического равновесия использовался алгоритм, основанный на минимизации свободной энергии Гиббса. Решение отыскивалось в осесимметричной расчетной области, соответствующей проточной части реактора ТХП.

Расчетная область покрывалась неравномерной прямоугольной сеткой, включавшей 6525 контрольных ячеек. На границах расчетной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на входных границах – значения независимых переменных; на стенках – условия прилипания; на выходной границе – «мягкие» граничные условия. Для описания турбулентного пограничного слоя использовались функции стенки.

При моделировании дискретной фазы задавались начальные условия для каждого «пакета» частиц: положение частицы (координаты x_j), ее скорость (компоненты u_{pj}), диаметр, температура и массовый расход частиц, следующих вдоль траектории. Полагалось, что при столкновении со стенкой частица упруго отражается от нее.

Были подготовлены исходные данные для расчетов шести вариантов запитки реактора ТХП реагентами: воздух + уголь; воздух + уголь + водород; воздух + уголь + метан; воздух + уголь + водород + кислород; воздух + уголь + метан + кислород; воздух + уголь + кислород. Для всех вариантов коэффициент избытка воздуха составлял $\alpha = 0,2$; массовый расход воздуха – $G_v = 8$ г/с. Начальная температура всех реагентов полагалась равной 500 К. Начальная скорость частиц угля принималась равной местной скорости воздуха на входе в реактор. Ниже приведены исходные данные численного моделирования реактора ТХП: расходы топлив, кислорода, массовые и мольные доли компонентов воздуха (табл. 1); элементарный состав угля и мольные доли компонентов горючей смеси первичного топлива (табл. 2); теплотехнические характеристики угля и дисперсный состав угольной пыли (табл. 3).

Для задания состава угля использовались мольные доли компонентов горючей массы. Поэтому элементарный состав угля от рабочей массы к горючей был приведен с помощью обычной пропорции (табл. 2). Для задания доли горючих компонентов (табл. 3) было выполнено приведение рабочей массы углерода к сухой массе аналогичным способом.

Таблица 1

Расходы топлив, кислорода, массовые и мольные доли компонентов воздуха

Вариант	1	2	3	4	5	6
Топливо	АШ	АШ + Н ₂	АШ + СН ₄	АШ + Н ₂ + О ₂	АШ + СН ₄ + О ₂	АШ + О ₂
Расходы, кг/с:						
$G_{\text{АШ}}$	6,431	6,08	6,03	6,436	6,354	6,796
$G_{\text{Н}_2}$	–	0,061	–	0,061	–	–
$G_{\text{СН}_4}$	–	–	0,142	–	0,1496	–
$G_{\text{О}_2}$	–	–	–	0,488	0,4887	0,515
Массовые доли компонентов воздуха:						
$g_{\text{О}_2}$	0,232	0,232	0,232	0,27615	0,2762	0,27845
$g_{\text{Н}_2}$	0,768	0,768	0,768	0,72385	0,7238	0,72155
Мольные доли компонентов воздуха:						
$r_{\text{О}_2}$	0,2091	0,2091	0,2091	0,25027	0,25032	0,25243
$r_{\text{Н}_2}$	0,7909	0,7909	0,7909	0,74973	0,74968	0,74757

Таблица 2

Элементарный состав угля и мольные доли компонентов продуктов газификации угля

Элементы	С	Н	С	О	Н	W	А	V (летучие)
Рабочая масса, %	49,06	1,55	1,5	2,88	0,55	3,09	41,3	7,8
Сухая масса, %	50,66	–	–	–	–	–	–	–
Горючая масса, %	88,33	2,79	2,7	5,19	0,99	–	–	–
Мольные доли компонентов	0,6924	0,2625	0,0079	0,0305	0,0067	–	–	–

Полнота сгорания угля вычислялась по формуле:

$$\eta = \frac{(V_{in} - V_{fin}) + (C_{in} - C_{fin})}{V_{in} + C_{in}}, \quad (19)$$

где V_{in} и V_{fin} – начальный и конечный выход летучих соответственно, кг/с;
 C_{in} и C_{fin} – начальный и конечный выход продуктов газификации кокса соответственно, кг/с.

Таблица 3

Основные теплотехнические характеристики угля и дисперсный
состав угольной пыли

Показатель	Величина
Плотность, кг/м ³	1550
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	1680
Теплопроводность, Вт/(м·К)	202,4
Низшая теплота сгорания (горючая), кДж/кг	32386,4
Доля горючих компонентов, %	50,66
Доля летучих компонентов, %	7,8
Температура начала выхода летучих, К	700
Скрытая теплота образования летучих, кДж/кг	$1,1 \cdot 10^4$
Стехиометрический коэффициент продуктов газификации кокса	2,67
Минимальный начальный диаметр частиц угля, мкм	10
Максимальный начальный диаметр частиц угля, мкм	250
Медианный начальный диаметр частиц угля, мкм	57

Результаты численных расчетов вариантов 2 – 5 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов процессов в реакторе ТХП

Вариант	2	3	4	5
Подпитка	H ₂	CH ₄	H ₂ +O ₂	CH ₄ +O ₂
Параметры на выходе реактора				
Скорость газа, м/с	3,12	3,31	3,73	4,09
Среднее время пребывания угольных частиц, с	0,357	0,339	0,301	0,276
Полнота сгорания летучих, %	100	100	100	100
Полнота сгорания кокса, %	9,26	8,28	14,2	15,6
Полнота сгорания угля, %	21,4	20,5	25,7	26,9
Температура газа, К	1382	1514	1594	1754
Массовая доля O ₂	$2,7542 \cdot 10^{-5}$	$7,0328 \cdot 10^{-5}$	$1,8847 \cdot 10^{-6}$	$2,2863 \cdot 10^{-5}$
Массовая доля CO ₂	0,16135	0,17346	0,20358	0,19077
Массовая доля CO	0,073114	0,08586	0,07894	0,11966
Массовая доля H ₂ O	0,063289	0,043658	0,06655	0,047466
Массовая доля H ₂	0,002094	0,0014397	0,0017225	0,001496
Массовая доля CH ₄	0,0010585	$3,258225 \cdot 10^{-5}$	0,00068132	0,0001296

Численные расчеты вариантов 1 и 6 показали, что без предварительного подогрева продуктами сгорания метана или водорода угольная пыль в преде-

лах реактора не выгорает. Это обусловлено тем, что температура начала выхода летучих (700 K) выше начальной температуры реагентов (500 K), а модель выгорания коксового остатка включается только по окончании выхода летучих.

На рис. 1 – 10 представлены результаты расчетов для второго варианта.

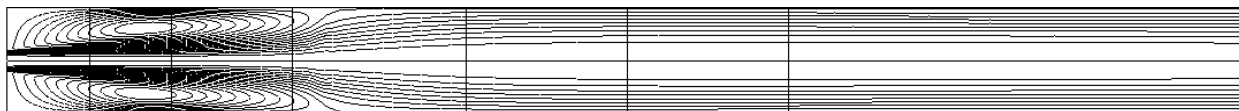


Рис. 1. Линии тока газа



Рис. 2. Температура газа:
минимальная – 500 K (белый), максимальная – 1845,5 K (черный)



Рис. 3. Траектории угольных частиц, окрашенные в соответствии с их температурой:
минимальная – 500 K (белый), максимальная – 1750,344 K (черный)



Рис. 4. Массовая доля подсветочного топлива (CH_4):
минимальная – 0 (белый), максимальная – 1 (черный)

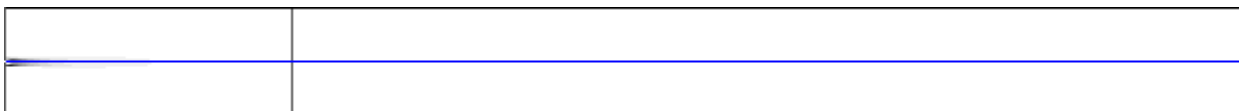


Рис. 5. Дисперсия массовой доли подсветочного топлива (CH_4):
минимальная – 0 (белый), максимальная – 0,0513 (черный)



Рис. 6. Скорость выхода летучих:
минимальная – 0 (белый), максимальная – $1,0564 \cdot 10^{-6}$ кг/с (черный)

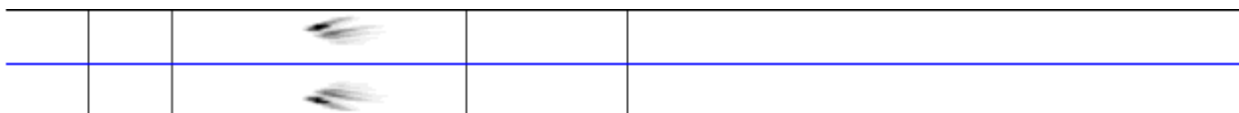


Рис. 7. Скорость выгорания кокса:
минимальная – 0 (белый), максимальная – $1,1721 \cdot 10^{-6}$ кг/с (черный)



Рис. 8. Массовая доля продуктов газификации угля:
минимальная – 0 (белый), максимальная – 0,08396 (черный)

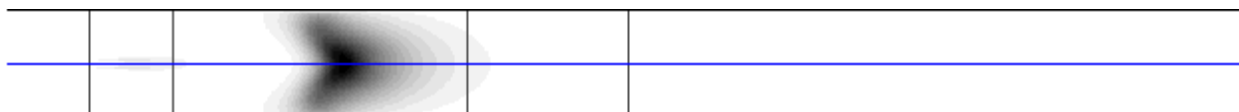


Рис. 9. Дисперсия массовой доли продуктов газификации угля:
минимальная – 0 (белый), максимальная – 0,000544 (черный)

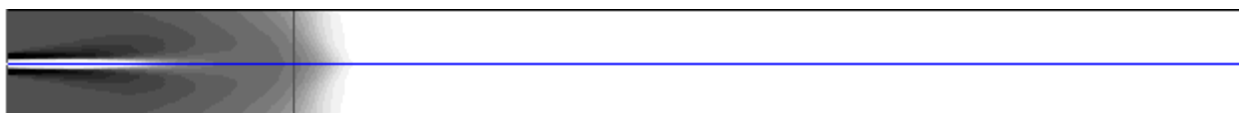


Рис. 10. Массовая доля O_2 :
минимальная – 0 (белый), максимальная – 0,232 (черный)

Выводы.

При нагреве угля продуктами сгорания водорода температура газа на выходе из реактора ниже, чем при нагреве угля продуктами сгорания метана (в необогащенном кислородом воздухе – на 132 К, в обогащенном кислородом воздухе – на 160 К).

При нагреве угля продуктами сгорания водорода и при нагреве угля продуктами сгорания метана в обогащенном кислородом воздухе температура газа на выходе из реактора выше, чем при использовании необогащенного кислородом воздуха на 212 К и на 240 К соответственно.

Полнота сгорания угля в реакторе выше, чем при нагреве угля продуктами сгорания водорода и при нагреве угля продуктами сгорания метана в необогащенном кислородом воздухе на 4,3 % и 6,4 % соответственно.

Во всех случаях структура течения в реакторе характеризуется наличием тороидальной зоны обратных токов за внезапным расширением поперечного сечения реактора, которая отклоняет траектории угольных частиц к перифе-

рии. В слое смешения круглой струи, поступающей из центрального капилляра, происходит химическая реакция горения водорода или метана с образованием продуктов сгорания, часть которых вовлекается в зону обратных токов и обеспечивает стабилизацию пламени газообразного топлива. Угольные частицы, пролетая через высокотемпературную область, нагреваются до температуры начала выхода летучих. Участок прогрева частиц занимает примерно $\frac{1}{4}$ часть длины реактора. По окончании выхода летучих газифицируется и выгорает кокс, после чего частицы золы выносятся газовым потоком из реактора. Зоны выхода летучих, газификации и выгорания кокса локализованы в конце участка прогрева ближе к оси реактора. Максимальная температуры газа достигается ниже по течению от этого участка в периферийной зоне, непосредственно примыкающей к стенке трубы. На оставшейся длине реактора температура и состав газовой смеси изменяются незначительно, кислород практически отсутствует. На выходе из реактора наряду с продуктами полного сгорания CO_2 (16...20 %) и H_2O (4...7 %) имеется значительное количество CO (7...11 %) и заметное количество H_2 (0,15...0,2 %), что обеспечивает высокую реакционную способность смеси.

Список литературы: 1. *Мацевитый Ю.М.* Инновационные технологии модернизации энергоблоков ТЭС – эффективный путь обеспечения устойчивого функционирования энергетического комплекса Украины / [Ю.М. Мацевитый, Н.Г. Шульженко, В.Н. Голощанов и др.]. // Проблемы машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 4 – С. 9 – 15. 2. *Мацевитый Ю.М.* Применение водородных технологий для повышения энергоэффективности энергоблоков ТЭС в условиях дефицита природного газа / Ю.М. Мацевитый, В.В. Соловей, П.М. Канило. // Вестник инженерной академии Украины. – 2007. – № 2. – С. 148 – 152. 3. *Кроу Д.* Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц / Д. Кроу. // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – № 32. – С. 114 – 122. 4. *Launder B. E.* Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. 5. *Jones M.* Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows / M. Jones, J.H. Whitelaw. // A Review Combust. Flame. – 1982. – V. 48. – P. 2 – 26. 6. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с. 7. *Badzioch S.* Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles / S. Badzioch, P.G.W. Hawksley. // Ind. Eng. Chem. Process Design and Development. – 1970. – № 9. – P. 521 – 530. 8. *Vandoormaal J.P.* Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows / J.P. Vandoormaal, G.D. Raithby. // Numer. Heat Transfer. – 1984. – № 7. – P. 147 – 163.

Поступила в редколлегию 23.03.09